# 青藏高原水资源演变与趋势分析

张建云[1,2,3*] 刘九夫[1,2] 金君良[1,2,3] 马 涛[1,2] 王国庆[1,2,3]
刘宏伟[1,2] 闵 星[1,2] 王 欢[1,2] 林 锦[1,2] 鲍振鑫[1,2] 刘翠善[1,2]
1 南京水利科学研究院 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室 南京 210029
2 水利部应对气候变化研究中心 南京 210029
3 长江保护与绿色发展研究院 南京 210098



摘要 青藏高原及周边地区是长江、黄河、雅鲁藏布江等河流的发源地，素有“亚洲水塔”之称。分析青藏高原地表水、地下水资源量的演变规律和与变化趋势，对青藏高原水资源及水生态保护以及区域发展具有重要战略意义和科学价值。基于河流源区主要江河水文站实测径流资料分析发现，由于降水增多、气温升高等气候变化的影响，青藏高原多数区域地表河川径流量呈现增加趋势，季节过程也发生了明显变化，长江、怒江和雅鲁藏布江河源区径流增加趋势尤为显著。研究发现，气温升高导致的冰川积雪融化径流的增多是地下水资源量以及高原湖泊水量增加的主要原因。未来预测分析认为，随着冰川积雪的减少，融雪径流将会减少，部分河流径流量会出现由增转减的“拐点”，这将导致该区域的水资源安全面临新的问题和挑战。全球变化对青藏高原水资源演变的影响需引起高度重视，并积极采取应对措施。

关键词 青藏高原，水资源演变，趋势分析，认识与思考

DOI 10.16418/j.issn.1000-3045.2019.11.009

青藏高原是长江、黄河、雅鲁藏布江、印度河、恒河等亚洲主要河流的发源地，也是湖泊、冰川、多年积雪和多年冻土的主要聚集区，为我国甚至亚洲水资源产生、赋存和运移的战略要地。青藏高原总面积约 $2.5\times10^6$ km$^2$，外流区和内流区面积约各占 1/2，海拔 4 000 m 及以上地区的面积约占 3/4，主要涉及西藏、青海、新疆、甘肃、四川等省、自治区的 32 个地级市，198 个县约 4 000 万人。据第一次全国水利普查河湖基本情况普查成果[1]，青藏高原集水面积（境内）50 km$^2$及以上的河流有 13 266 条，占全国同口径河流总数的 29.3%，其中集水面积 $1.0\times10^4$ km$^2$ 以上的河流有长江、黄河、塔里木河、雅鲁藏布江、澜沧江

*通讯作者
资助项目：国家自然科学基金（91647203、51779144、51879164、91647111），第二次青藏高原综合科学考察研究（SQ2019QZKK2303）
修改稿收到日期：2019年10月12日

和怒江；青藏高原常年水面面积 1 km$^2$ 及以上的湖泊有 1 129 个，占全国同口径湖泊总数的 39.4%，其中水面面积 1 000 km$^2$ 以上的湖泊有青海湖、色林错、纳木错和扎日南木错。

第二次青藏高原综合科考研究将逐项开展与河流及区域水资源演变趋势密切相关的工作。本文根据青藏高原长江、黄河、雅鲁藏布江、澜沧江和怒江 5 条主要河流的长系列实测流量资料和已有的文献及成果，重点分析主要河流 1960—2018 年河川径流变化、区域地下水变化情况，并对青藏高原水资源演变与趋势提出初步认识。

## 1 1960—2018 年青藏高原河川径流变化分析

长江、黄河、澜沧江、怒江和雅鲁藏布江 5 条河流均发源于青藏高原，本文分别选择源区的直门达、唐乃亥、昌都、嘉玉桥和奴下 5 个代表性水文站的长序列水文资料。各站点资料均来源于省级水文管理部门，分析实测年径流和月径流的历史变化特征，河流及水文站点分布见图 1，各站点及资料情况见表 1。

采用 Mann-Kendall 检验法[2]（简称 MK 检验），分别在 $\alpha$=0.05（显著）和 $\alpha$=0.01（非常显著）水平下，检验月、年径流标准化 MK 统计量 $Z_{MK}$ 的显著性，从而分析各条河流源区流域年径流和月径流的变化趋势。

表 1　青藏高原主要河流代表性水文站基本特征

| 站名 | 所在河流 | 东经 | 北纬 | 集水面积（km²） | 资料起止时间（年） |
|---|---|---|---|---|---|
| 直门达 | 长江 | 97°14′17.2″ | 33°00′46.2″ | 138799 | 1957—2018 |
| 唐乃亥 | 黄河 | 100°09′18.1″ | 35°29′58.5″ | 122277 | 1956—2018 |
| 昌都 | 澜沧江 | 97°10′44.4″ | 31°07′37.0″ | 53512 | 1960—2018 |
| 嘉玉桥 | 怒江 | 96°14′1.1″ | 30°52′37.5″ | 73632 | 1981—2018 |
| 奴下 | 雅鲁藏布江 | 94°38′56.6″ | 29°27′59.5″ | 201809 | 1956—2018 |




图 1　青藏高原主要河流及代表性水文站分布图
箭头方向代表上升或下降趋势；实心箭头表示非常显著，空心箭头表示不显著

## 1.1 长江源区

1957—2018 年长江源直门达水文站实测年径流演变特征见图 2a 和 b。从图中可以看出，过去 62 年来长江源河川径流量呈现出上升趋势，上升速率约为 4.94%/10 a（约 $6.5\times10^8$ m³），MK 检验值为 2.2，上升趋势显著。年径流序列的突变点发生在 2005—2007 年。1957—2018 年长江源直门达水文站实测月径流 MK 检验结果见图 2c。从图中可以看出该时间段所有月份的径流量都呈现出上升趋势，全年有 7 个月的径流上升趋势显著，3 个月（3月、4月和 11月）的径流上升趋势非常显著，其中 3 月和 4 月的径流上升趋势最为显著。

## 1.2 黄河源区

1956—2018 年黄河源唐乃亥水文站实测年径流演变特征见图 3a 和 b。过去 63 年来黄河源河川径流量呈现出下降趋势，下降速率约 −1.10%/10 a（约 $2.2\times10^8$ m³），MK 检验值 $Z_{MK}$ 为 −0.76，下降趋势不显著。年径流呈现出先增大后减少，再增加的阶段性特征，突变点发生在 1991—1993 年。黄河源区 20 世纪 50 年代中期—60 年代中期属于枯水期；20 世纪 70—80 年代属于丰水期；20 世纪 90 年代初径流发生突变性减少，随后持续回升。

黄河源区径流有 40%—60% 集中在每年 7—8月 [3]。对 1956—2018 年各月径流 MK 检验结果（图 3c）表明，所有月份的径流量变化趋势均不显著。其中 6 月和 12 月的径流量呈上升趋势，其余 10 个月的径流量呈现下降趋势，5 月、8月和 9月的径流下降程度较大。

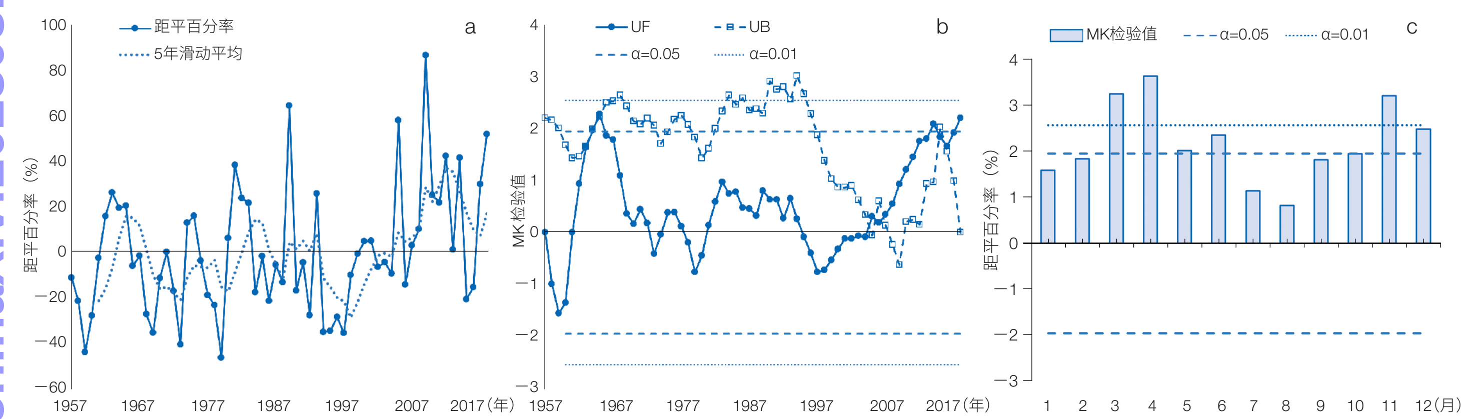



图 2　长江源直门达水文站年径流变化特征

（a）时间序列；（b）年径流 MK 检验；（c）月径流 MK 检验

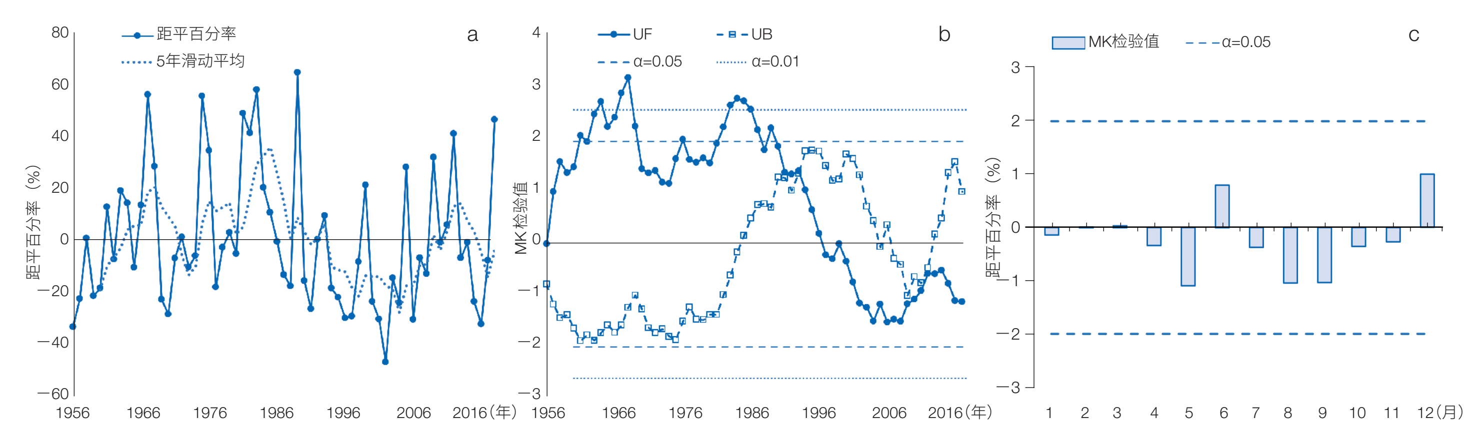



图 3　黄河源唐乃亥水文站年径流变化特征

（a）时间序列；（b）年径流 MK 检验；（c）月径流 MK 检验

### 1.3 澜沧江源区

1960—2018年澜沧江源昌都水文站实测年径流演变特征见图4a和b。从图中可以看出，过去59年来澜沧江源河川径流呈现出上升趋势，上升速率约为0.91%/10 a（约$1.4\times10^8$ m³），MK检验值为0.67，上升趋势不显著。年径流序列的突变点分别发生在1965和2014年。1960—2018年澜沧江源昌都水文站实测月径流MK检验结果见图4c。从图中可以看出除8月和9月，其他月份的径流量都呈现出上升趋势，仅2月的径流上升趋势达到了显著水平；9月份径流量呈不显著下降趋势。

### 1.4 怒江源区

怒江源区以嘉玉桥水文站为径流出口站。从1981—2018年共38年的径流量变化及MK检验结果（图5a和b）来看，怒江源区年径流量总体呈上升趋势，平均增长速率约为2.15%/10 a（约$5.4\times10^8$ m³），MK检验值$Z_{MK}$为1.52，上升趋势不显著。年径流量过程在20世纪80年代呈减小趋势，到20世纪90年代初以后变为增加趋势，突变发生在1991—1993年。怒江源区20世纪80年代—90年代中期径流量总体偏枯，20世纪90年代后期进入丰水时段，到2006年之后进入平水期。

1981—2018年各月径流MK检验结果（图5c）表明，除5月和7月以外，各月径流量均有上升的变化趋势，其中4月和11月上升显著，12月、1月、2月和3月上升非常显著。

### 1.5 雅鲁藏布江源区

1956—2018年雅鲁藏布江奴下水文站实测年径流

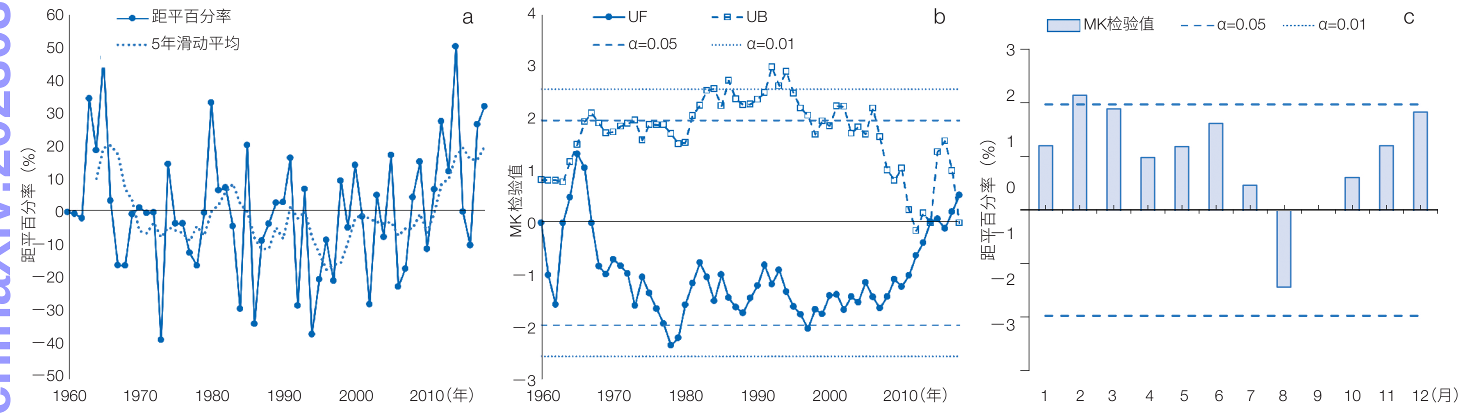



图4 澜沧江源昌都水文站年径流变化特征

（a）时间序列；（b）年径流MK检验；（c）月径流MK检验

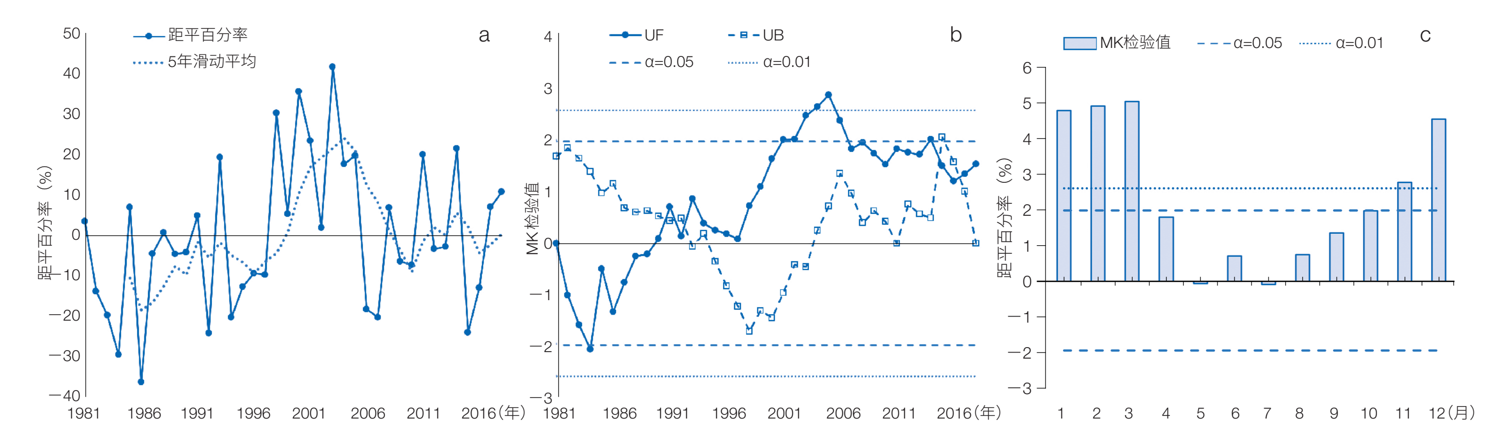



图5 怒江源嘉玉桥水文站年径流变化特征

（a）时间序列；（b）年径流MK检验；（c）月径流MK检验

演变特征见图 6a 和 b。从图中可以看出，过去 63 年来雅鲁藏布江河川径流呈现出上升趋势，其上升速率为0.91%/10 a（约 $5.4\times10^8$ m³），MK 检验值为 0.85，上升趋势不显著。年径流呈现出先增大后减少，再增加又减少的阶段性特征，突变点分别发生在 1966 年和 1998 年左右。1956—2018 年雅鲁藏布江奴下水文站实测月径流 MK 检验结果见图 6c。从图中可以看出除 8 月份外，其他月份的径流量都呈现出不显著上升趋势，其中冬季径流上升程度较大。

### 1.6 讨论

青藏高原五大主要河流源区的径流量除黄河源区有微弱下降外，其余河流源区径流量都呈现不同程度的上升趋势，其中长江源区的上升趋势较显著，其他河流上升趋势均不明显。径流量上升速率范围为 $0.26\times10^8$—$0.73\times10^8$ m³/（$10^4$ km²·10 a），处于同一量级，其中单位流域面积径流量上升最快的是怒江源区。从月径流变化来看，径流量呈现上升趋势的长江、澜沧江、怒江、雅鲁藏布江 4 个流域春季、秋季和冬季径流量增长趋势更为明显，而夏季径流量变化趋势较小且部分出现下降趋势，这与全球变暖背景下冬季最低温度升高显著和春秋冰川雪盖融化量增加等密切相关。

## 2 青藏高原地下水的变化

青藏高原地下水资源丰富，区域内主要涉及的西藏自治区、青海省、四川省地下水资源总量分别为 $1105.7\times10^8$ m³、$424.2\times10^8$m³ 和 $635.1\times10^8$m³ ①。青藏高原地下水储存对区域牧业、种植业、制造业和生态系统保护恢复至关重要，也关系着雅鲁藏布江、长江、黄河、怒江等重要江河的补给，对保障区域经济社会发展具有重要意义。

### 2.1 地下水储量分布与变化特征

目前，分析大尺度地下水资源储量的主要方法多为基于 GRACE 重力卫星数据并结合大尺度水文模型、地面观测、航空遥感等数据进行评估计算。

青藏高原水资源在 2003—2012 年总体上经历了储存量增加过程，年增长率为 9.7 mm/a，而喜马拉雅山脉则经历了冰川急剧退缩过程，冰川雪水当量以 20.2 mm/a 的速率在损失[4]。青藏高原的 8 个主要区域地下水储量在 2003—2009 年均呈现增加的变化，包括金沙江流域 $(24.6\pm22.4)\times10^8$ m³/a、怒江—澜沧江源区 $(17.7\pm20.9)\times10^8$ m³/a、长江源区 $(18.6\pm16.9)\times10^8$m³/a、黄河源区 $(11.4\pm13.9)\times10^8$m³/a、柴达木盆地 $(15.2\pm9.5)\times10^8$ m³/a、羌塘自然保护区 $(13.6\pm15.2)\times10^8$m³/a、

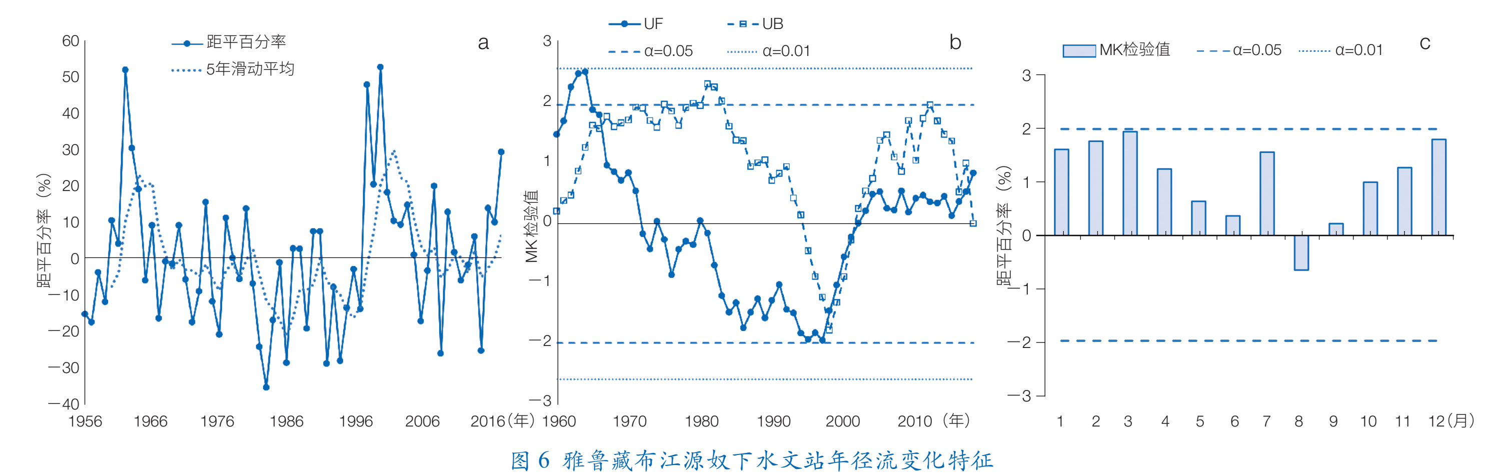



图 6 雅鲁藏布江源奴下水文站年径流变化特征
（a）时间序列；（b）年径流 MK 检验；（c）月径流 MK 检验

① 数据来源于《2018 年中国水资源公报》。

印度河上游 $(53.7\pm21.7)\times10^8\ m^3/a$ 以及阿克苏河流域 $(27.7\pm9.9)\times10^8\ m^3/a$，其主要原因是喜马拉雅山脉不断加剧的冰川融化、冻土消融以及中国在三江源区的生态保护与建设项目等行政行为[5]。但同样受“亚洲水塔”影响的中国西南周边的阿富汗、巴基斯坦、印度（北部）和孟加拉国等国家，则因地下水的无节制开采导致了地下水存储量的损失[6-9]，其中印度最为严重。2002 年 4 月—2008年 6 月，印度以 $(540\pm90)\times10^8\ m^3/a$ 的速率损失地下水，年地下水损失量相当于印度最大地表水库蓄水量的 2 倍，这可能是地球上任何类似规模的地区中地下水流失率最大的[8]。

### 2.2 地下水径流特征与影响

青藏高原山地冰川大幅度退缩和湖泊体量增加的趋势明显[6]。湖泊面积增加主要原因可能是冰川积雪消融水、冻土融水和降水的流入，地下水在此过程中具有不可忽视的推动作用。地下水从补给区以降水、冰雪融水的形式补给，最终在高原山谷和邻近盆地以泉水、侧向补给河水与湖泊的形式排放[10]。

高原地区的地下水流动由地形梯度驱动，其循环深度可达 1—2 km，并可能携带地热能出露地表形成温泉水，这可能是破坏永久冻土并在高原上形成多年冻土消融区域的重要机制[11]。多年冻土消融形成的水资源量十分可观[12]，这不仅使得区域地下水储量增加，冻土层隔水效应的削弱也加剧了地下水与地表水体间的交换。因此，地下水径流量的增加也是间接导致高原湖泊数量与体量增加的因素。

### 2.3 地下水资源的演变趋势

大量研究成果表明，由于气候变暖，喜马拉雅山大部分冰川、积雪、永久性冻土在近年间经历了加速融化[13,14]。在此条件下，未来地下水在高海拔源区补给充分，加之在青藏高原地下水具有非常特殊的深储存和深循环特征[9]，使得地下水可携带更多的热能冲击地表多年冻土层，这进一步加剧多年冻土的消融速度。冻土层的消融使得地表水和地下水之间的隔断逐渐消失，地下水与地表水的交换将更为频繁。由此预见，高海拔区域的地下水补给与相对低海拔区域的地下水自然排泄都将增大。在不扩大开采的条件下，未来青藏高原的地下水资源量及储量都将呈现增加的趋势。

## 3 青藏高原水资源变化的初步认识

20 世纪 50 年代初期以来，青藏高原经受了显著的气候变化影响，其年均气温呈现明显的上升趋势。1955—1996 年，青藏高原地区年均气温每 10 年上升 0.16℃。到 20 世纪 80 年代中期，青藏高原升温率陡增，并于 20 世纪 90 年代达到最大值。1998—2013 年，青藏高原地区年均气温每 10 年上升 0.25℃[15]。这一系列气候变化对青藏高原的冰冻圈产生了极为不利的影响，包括冰川退缩、积雪覆盖减少、冻土退化、活动层增厚等，并直接或间接地对青藏高原水资源产生了深远影响。

冰川是重要的淡水资源赋存形式，青藏高原拥有地球上第三大冰川群，冰川总面积达 50 657 $km^2$，冰川总储量为 4 680 $km^3$，是北极和南极之外最大的淡水资源储存库。冰川融水是发源于青藏高原河流的重要补给来源，冰川融水补给大约可占青藏高原河川径流的6%—45%。全球变暖导致冰川融化速度加快，青藏高原的冰川面积已经由 20 世纪 70 年代的 48 800 $km^2$，缩减至 21 世纪初的 44 400 $km^2$，平均每年减少约 147 $km^2$，总减少率达 9.05%。特别是帕米尔高原、喜马拉雅山，冰川累计消减达到了原有面积的 15% 以上。长江源头沱沱河和巴曲河流域 2009 年的冰川面积较 1970 年分别减少 20.83% 和 34.81%[16]。冰川退缩直接影响了青藏高原河川径流的季节分配特征，河流洪峰起点提前[17]。然而，由于流域条件、气候、径流补给来源和补给比例不同，气候变化背景下青藏高原地区的河川年径流量变化趋势差异较大，即使在同一个流域内，不同子流域之间的河川径流变化趋势也不尽相同。发源于青藏高原的河流，径流量的补给包括降水补给、冰川融水补给、地下水补给 3 种主要方式。

一般而言，青藏高原北部、东部和东南部地区，河川径流主要受降水主导；而在中部和西部地区，河川径流受冰川融水或受地下水补给为主，或受两者共同主导[18]。因此，冰川融水对雅鲁藏布江和印度河的贡献率较高，分别达 12% 和 48%。而对长江和怒江的贡献率只有 5%—7%，对黄河和澜沧江的贡献率不足 2%。降水是黄河、长江、澜沧江、怒江和雅鲁藏布江年径流量的主要补给来源，贡献率为 65%—78% [19]。

一般而言，冰川消融在短期内将会带来河川径流的增加，但从长远来看，随着冰川的逐步减少，冰川融水将随之减少。全球变暖背景下，冰川融水径流量会呈现先增加后减少的演变态势。冰川融水"先增后减"拐点的出现时间，主要与流域冰川的大小、面积、降水变化、温度变化等因素有关。目前监测资料表明，冰川覆盖率低、以小冰川为主的流域，冰川融水"先增后减"的拐点可能已经或即将出现，如祁连山的北大河流域、石羊河流域等；结合气候变化趋势的模拟结果，青藏高原的部分流域在未来 10—20 年会出现冰川融水拐点，如在黑河、疏勒河以及长江源等流域；相比而言，具有大型冰川的流域，由于调蓄能力较大，冰川融水拐点出现时间会相对较晚[20]。

根据第二次水资源综合评价 1956—2000 年水资源量系列，以及 2001—2018 年长江流域及西南诸河水资源公报资料进行分析，结果表明澜沧江、怒江和伊洛瓦底江水资源量呈不显著减少趋势；金沙江石鼓以上、雅鲁藏布江水资源量呈不显著增加趋势，降水量变化趋势与水资源量的变化趋势一致，降水量变化是影响流域水资源量的主要因素。

伴随气候变化和冰冻圈变化，青藏高原地区湖泊的水面面积、形状等也发生了显著变化。例如，色林错 2010 年与 1997 年湖泊形状的变化（图 7）。20 世纪 70 年代—2010 年，青藏高原新出现了 99 个面积大于 1 km$^2$ 的湖泊；81% 的原有湖泊面积扩张，总扩张面积为 7 240 km$^2$，占湖泊总面积的 18.4%[21]。与 1976 年相比，纳木错湖泊面积增加了 51.8 km$^2$，占湖泊总面积的 2.7%[22]。在青藏高原气候向暖湿化方向发展的背景下，湖泊面积变化与气候要素具有显著相关性，以冰雪融水为主要补给源的湖泊主要受气温影响，而以地表径流为主要补给来源的湖泊主要受降水量影响。从扩张趋势来看，以冰雪融水为主要补给来源的湖泊整体扩张趋势明显，以地表径流和河流补给为主要补给源的湖泊也呈扩张趋势[23]，但不及前者。

## 4 结语

青藏高原及其周边地区作为"亚洲水塔"，是湖泊、冰川、多年积雪和多年冻土的主要聚集区，是我国甚至亚洲水资源产生、赋存和运移的战略要地。本文根据青藏高原长江、黄河、雅鲁藏布江、澜沧江和




图 7　色林错湖泊形状对比图
（a）1997 年 12 月；（b）2010 年 12 月

怒江等主要河流的长时间系列实测流量资料和已有的文献及成果，分析了青藏高原过去几十年河川径流变化及趋势、区域地下水变化情况，并提出了关于青藏高原径流及水资源演变与趋势的3点初步认识。

（1）长江、澜沧江、怒江和雅鲁藏布江源区年径流量有增加趋势，黄河源区径流呈现微减少趋势。其中，长江源区增加趋势显著，其他河流变化不明显。季节上来看，春季、秋季和冬季径流量增长趋势更为明显，夏季径流变化不显著。降水和升温导致的融雪增多是径流量增加的主要原因。

（2）青藏高原地区地下水资源丰富，区域地下水资源量总体上呈现增加趋势。整体增加的趋势主要归因为喜马拉雅山脉不断加剧的冰川融化、冻土消融以及中国在三江源区的生态保护和建设项目等。但是，受“亚洲水塔”水影响的中国西南周边国家，如阿富汗、巴基斯坦、印度（北部）和孟加拉国等国家的地下水无节制开采，地下水存储量减少显著。

（3）青藏高原湖泊总体上呈现增加趋势，以冰雪融水为主要补给来源的湖泊整体扩张趋势明显。在青藏高原气候暖湿化方向发展背景下，湖泊面积变化与气候要素具有显著的区域相关性。此外由于青藏高原区域内的升温导致冰川消融，水资源量在短期内有所增加，但从长远来看，随着冰川的减少，冰川融水亦将随之减少。全球变暖背景下，部分冰川融水补给的河流径流量会呈现先增加后减少的演变态势。

## 参考文献


1 《第一次全国水利普查成果丛书》编委会. 河湖基本情况普查报告. 北京: 中国水利水电出版社, 2017.

2 Yue S, Wang C Y. The Mann-Kendall test modified by effective sample size to detect trend in serially correlated hydrological series. Water Resources Management, 2004, 18(3): 201-218.

3 苏中海, 陈伟忠. 1956—2012年黄河源区径流变化特征分析. 现代农业科技, 2016, (22): 178-180.

4 Guo J, Mu D, Liu X, et al. Water storage changes over the Tibetan Plateau revealed by GRACE mission. Acta Geophysica, 2016, 64(2): 463-476.

5 Xiang L, Wang H, Steffen H, et al. Groundwater storage changes in the Tibetan Plateau and adjacent areas revealed from GRACE satellite gravity data. Earth & Planetary Science Letters, 2016, 449: 228-239.

6 Zou F, Tenzer R, Jin S. Water storage variations in Tibet from GRACE, ICESat, and hydrological data. Remote Sensing, 2019, 11: 1103.

7 Aziz M A, Abul Kashem Majumder M, Kabir M, et al. Groundwater Depletion with Expansion of Irrigation in Barind Tract: A Case Study of Rajshahi District of Bangladesh. International Journal of Geology, Agriculture and Environmental Sciences, 2015, 3: 32-38.

8 Tiwari V M, Wahr J, Swenson S. Dwindling groundwater resources in northern India, from satellite gravity observations. Geophysical Research Letters, 2009, 36(18): 184-201.

9 Muradi S, Phien-Wej N, Giao P. Depletion of water resources, issues and challenges of water supply management in Mazar-i-Sharif City, Afghanistan. Research Journal of Environmental and Earth Sciences, 2013, 5: 242-251.

10 Cheng G, Jin H. Permafrost and groundwater on the Qinghai-Tibet Plateau and in northeast China. Hydrogeology Journal, 2013, 21(1): 5-23.

11 Ge S, Wu Q B, Lu N, et al. Groundwater in the Tibet Plateau, western China. Geophysical Research Letters, 2008, 35(18): 80-86.

12 叶仁政, 常娟. 中国冻土地下水研究现状与进展综述. 冰川冻土, 2019, 41(1): 183-196.

13 Gardner A S, Geir M, J Graham C, et al. A reconciled estimate of glacier contributions to sea level rise: 2003 to 2009. Science, 2013, 340(6134): 852-857.

14 Kääb A, Nuth C, Treichler D, et al. Brief communication:

Contending estimates of early 21st century glacier mass balance over the Pamir-Karakoram-Himalaya. Cryosphere Discussions, 2014, 8(6): 5857-5874.

15 Yao T, Xue Y, Chen D, et al. Recent Third Pole's rapid warming accompanies cryospheric melt and water cycle intensification and interactions between monsoon and environment: Multidisciplinary approach with observations, modeling, and analysis. Bulletin of the American Meteorological Society, 2019, 100(3): 423-444.

16 Wu S, Yao Z, Huang H, et al. Glacier retreat and its effect on stream flow in the source region of the Yangtze River. Journal of Geographical Sciences, 2013, 23(5): 849-859.

17 Gao J, Yao T D, Delmotte V M, et al. Collapsing glaciers threaten Asia's water supplies. Nature, 2019, 565: 19-21.

18 Lan C, Zhang Y X, Zhu F X, et al. Characteristics and changes of streamflow on the Tibetan Plateau: A review. Journal of Hydrology: Regional Studies, 2014, 2: 49-68.

19 Zhang L L, Su F G, Yang D Q, et al. Discharge regime and simulation for the upstream of major rivers over Tibetan Plateau. Journal of Geophysical Research: Atmospheres 2013, 118: 8500-8518.

20 陈仁升, 张世强, 阳勇, 等. 冰冻圈变化对中国西部寒区径流的影响. 北京: 科学出版社, 2019: 66, 171-179.

21 Zhang G Q, Yao T D, Piao S L, et al. Extensive and drastically different alpine lake changes on Asia's high plateaus during the past four decades. Geophysical Research Letters, 2017, 44: 252-260.

22 Liu J, Kang S, Gong T, et al. Growth of a high-elevation large inland lake, associated with climate change and permafrost degradation in Tibet. Hydrology and Earth System Sciences, 2010, 14: 481-489.

23 闫利, 张廷斌, 易桂花, 等. 2000年以来青藏高原湖泊面积变化与气候要素的响应关系. 湖泊科学, 2019, 31(2): 573-589.

## Evolution and Trend of Water Resources in Qinghai-Tibet Plateau

ZHANG Jianyun[1,2,3*] LIU Jiufu[1,2] JIN Junliang[1,2,3] MA Tao[1,2] WANG Guoqing[1,2,3] LIU Hongwei[1,2] MIN Xing[1,2]
WANG Huan[1,2] LIN Jin[1,2] BAO Zhenxin[1,2] LIU Cuishan[1,2]

（1 State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China;
2 Research Center for Climate Change, Ministry of Water Resources, Nanjing 210029, China;
3 Yangtze Institute for Conservation and Development, Nanjing 210098, China）

**Abstract** The Qinghai-Tibet Plateau is the source of major Asian rivers such as the Yangtze River, the Yellow River, and the Yarlung Zangbo River, which is known as Asia's water tower. Analysis on the evolution rule and variation trend of surface water and groundwater resources in the Qinghai-Tibet Plateau is of great strategic and scientific importance to the water resources, water ecological protection, and future regional development of the Qinghai-Tibet Plateau. Based on the analysis of the observed runoff series of hydrological stations in the main rivers within source areas, it is found that the surface runoffs in most areas of the Qinghai-Tibet Plateau show an increasing trend impacted by climate change in terms of more precipitation and rising temperature, and indicates significant changes in seasonal processes. The runoffs increase more significantly in the source areas of the Yangtze, Nujiang,

* Corresponding author

and Yarlung Zangbo rivers. The results demonstrate that the dominant factor is increased glacier and snow melting flow to more groundwater and growth of plateau lakes, due to temperature rising. With the depletion of glacier and snowpack, the melting water will be reduced in future. Therefore, the break point of increase to decrease will arise in some river runoffs. Thus, the water security of this region will face new problems and challenges. High attention should be paid to the global change impact to water resources evolution in the Qinghai-Tibet Plateau, and positive responsive measures should be taken.

**Keywords** Qinghai-Tibet Plateau, water resources, trend analysis, understanding and thinking



**张建云** 中国工程院院士，英国皇家工程院外籍院士。水利部应对气候变化研究中心主任，长江保护与绿色发展研究院院长，国际水文科学协会中国国家委员会主席，中国水利学会副理事长和《水科学进展》杂志主编等。主持研究国家防汛抗旱指挥系统一期工程设计，研究并主持开发了“全国洪水预报系统”“国家防汛抗旱会商系统”“防汛抗旱水文气象综合信息系统”等系列业务系统。主要研究领域包括水文水资源、防汛抗旱、气候变化影响、水利信息化、水环境保护与治理等。E-mail: jyzhang@nhri.cn

**ZHANG Jianyun** Academician of Chinese Academy of Engineering, and International Fellow of the Royal Academy of Engineering. He is currently the Director of the Center for Climate Change Research of the Ministry of Water Resources, President of Yangtze Institute for Conservation and Development, Chairman of the CNC-IAHS, the vice President of China Water Conservancy Society and the Editor-in-Chief of *Advances in Water Science*. He has long been engaged in the scientific research works on the hydrology and water resources, flood control and drought, the impact of climate change, water informatization, and so on. He researches and presides of the development of a series of systems such as National Flood Forecasting System, National Flood Control and Drought Consultation System, Flood Control and Hydrological Meteorological Comprehensive Information System. He presides over the design and first project construction of the national flood control and drought relief command system engineering. The main research areas include Hydrology and Water Resources, Flood Control & Draught Resistance, impacts of climate change, Water Resources Information, Water Environmental Protection and Control. E-mail: jyzhang@nhri.cn

■责任编辑：文彦杰

## 参考文献（双语版）

1 《第一次全国水利普查成果丛书》编委会. 河湖基本情况普查报告. 北京: 中国水利水电出版社, 2017.

Editorial Board of *The First National Water Conservancy Census Results Series*. Census Report on the Basic Situation of Rivers and Lakes. Beijing: China Water & Power Press, 2017. (in Chinese)

2 Yue S, Wang C Y. The Mann-Kendall test modified by effective sample size to detect trend in serially correlated hydrological series. Water Resources Management, 2004, 18(3): 201-218.

3 苏中海, 陈伟忠. 1956—2012年黄河源区径流变化特征分析. 现代农业科技, 2016, (22): 178-180.

Su Z H, Chen W Z. Analysis on runoff variation characteristics of Yellow River source region from 1956 to 2012. Modern Agricultural Science and Technology, 2016, (22): 178-180. (in Chinese)

4 Guo J, Mu D, Liu X, et al. Water storage changes over the Tibetan Plateau revealed by GRACE mission. Acta Geophysica, 2016, 64(2): 463-476.

5 Xiang L, Wang H, Steffen H, et al. Groundwater storage changes in the Tibetan Plateau and adjacent areas revealed from GRACE satellite gravity data. Earth & Planetary Science Letters, 2016, 449: 228-239.

6 Zou F, Tenzer R, Jin S. Water storage variations in Tibet from GRACE, ICESat, and hydrological data. Remote Sensing, 2019, 11: 1103.

7 Aziz M A, Abul Kashem Majumder M, Kabir M, et al. Groundwater Depletion with Expansion of Irrigation in Barind Tract: A Case Study of Rajshahi District of Bangladesh. International Journal of Geology, Agriculture and Environmental Sciences, 2015, 3: 32-38.

8 Tiwari V M, Wahr J, Swenson S. Dwindling groundwater resources in northern India, from satellite gravity observations. Geophysical Research Letters, 2009, 36(18): 184-201.

9 Muradi S, Phien-Wej N, Giao P H. Depletion of water resources, issues and challenges of water supply management in Mazar-i-Sharif City, Afghanistan. Research Journal of Environmental and Earth Sciences, 2013, 5(5): 242-251.

10 Cheng G D, Jin H J. Permafrost and groundwater on the Qinghai-Tibet plateau and in northeast China. Hydrogeology Journal, 2013, 21(1): 5-23.

11 Ge S, Wu Q B, Lu N, et al. Groundwater in the Tibet Plateau, western China. Geophysical Research Letters, 2008, 35(18): 80-86.

12 叶仁政, 常娟. 中国冻土地下水研究现状与进展综述. 冰川冻土, 2019, 41(1): 183-196.

Ye R Z, Chang J. Study of groundwater in permafrost regions of China: Status and process. Journal of Glaciology and Geocryology, 2019, 41(1): 183-196. (in Chinese)

13 Gardner A S, Geir M, J Graham C, et al. A reconciled estimate of glacier contributions to sea level rise: 2003 to 2009. Science, 2013, 340(6134): 852-857.

14 Kääb A, Nuth C, Treichler D, et al. Brief communication: Contending estimates of early 21st century glacier mass balance over the Pamir-Karakoram-Himalaya. Cryosphere Discussions, 2014, 8(6): 5857-5874.

15 Yao T, Xue Y, Chen D, et al. Recent Third Pole's rapid warming accompanies cryospheric melt and water cycle intensification and interactions between monsoon and environment: Multidisciplinary approach with observations, modeling, and analysis. Bulletin of the American Meteorological Society, 2019, 100(3): 423-444.

16 Wu S, Yao Z, Huang H, et al. Glacier retreat and its effect on stream flow in the source region of the Yangtze River. Journal of Geographical Sciences, 2013, 23(5): 849-859.

17 Gao J, Yao T D, Delmotte V M, et al. Collapsing glaciers threaten Asia's water supplies. Nature, 2019, 565(7737): 19-

21.

18 Cuo L, Zhang Y X, Zhu F X, et al. Characteristics and changes of streamflow on the Tibetan Plateau: A review. Journal of Hydrology: Regional Studies, 2014, 2: 49-68.

19 Zhang L L, Su F G, Yang D Q, et al. Discharge regime and simulation for the upstream of major rivers over Tibetan Plateau. Journal of Geophysical Research: Atmospheres 2013, 118(15): 8500-8518.

20 陈仁升, 张世强, 阳勇. 冰冻圈变化对中国西部寒区径流的影响. 北京: 科学出版社, 2019: 66, 171-179.

Chen R S, Zhang S Q, Yang Y. Effects of Cryosphere Changes on Runoff in Cold Regions of Western China. Beijing: Science Press, 2019: 66, 171-179. (in Chinese)

21 Zhang G Q, Yao T D, Piao S L, et al. Extensive and drastically different alpine lake changes on Asia's high plateaus during the past four decades. Geophysical Research Letters, 2017, 44(1): 252-260.

22 Liu J S, Kang S C, Gong T, et al. Growth of a high-elevation large inland lake, associated with climate change and permafrost degradation in Tibet. Hydrology and Earth System Sciences, 2009, 14: 481-489.

23 闫利, 张廷斌, 易桂花, 等. 2000年以来青藏高原湖泊面积变化与气候要素的响应关系. 湖泊科学, 2019, 31(2): 573-589.

Lyu L, Zhang T B, Yi G H, et al. Changes of lake areas and its response to the climatic factors in Tibetan Plateau since 2000. Journal of Lake Sciences, 2019, 31(2): 573-589. (in Chinese)